고식적 생리적, 예측, 변형 임상 및 약식 셉트 공식들에 의해 계산된 셉트값의 상호비교

삼성의료원 마취과 및 서울대학교 의과대학 마취과학교실*

김정수 · 김대현* · 김종성* · 김성덕*
함 병 문* · 박 재 현* · 김 광 우*

- Abstract -

Comparisons between Shunts Derived from Four Shunts Equations; Classic Physiologic, Estimated, Modified Clinical and Simple Shunt Equations

Chung Su Kim, M.D., Dae Hyun Kim, M.D.*, Chong Sung Kim, M.D.*, Seong Deok Kim, M.D.*
Byung Moon Ham, M.D.*, Jae Hyon Park, M.D.* and Kwang Woo Kim, M.D.*

Department of Anesthesiology, Samsung Medical Center, Seoul, Korea
Department of Anesthesiology, College of Medicine, Seoul National University, Seoul, Korea*

Background: There are many factors such as diffusion abnormality, V/Q mismatch, intrapulmonary shunt, alveolar hypoventilation and F_iO_2 in reducing arterial hypoxemia. Intrapulmonary shunting can be due to blood going from the right to the left side of the heart without respiring with alveolar gas(true shunt mechanism) or blood that respire but achieves a PaO_2 less than the ideal (shunt effect mechanism). Understanding the portion of true shunt in patients with hypoxemia is very important indicator to analyze the effects of oxygen therapy. Several equations are used for calculation of physiologic shunt. The aim of this study was to calculate and compare shunts derived from four shunt equations; classic physiologic, estimated, modified clinical and simple equations.

Method: After cardiovascular stability following open heart surgery, 40 patients were mechanically ventilated with an $F_iO_2=1.0$. Arterial and mixed blood gases were measured. We calculated and compared shunts by classic physiologic [$Q_s/Q_T=(CcO_2-CaO_2)/(CcO_2-C\bar{v}O_2)$], estimated [$Q_s/Q_T=(CcO_2-CaO_2)/(3.5+CcO_2-C\bar{v}O_2)$], modified clinical [$Q_s/Q_T=AaDO_2 \times 0.0031/(AaDO_2 \times 0.0031 + CcO_2 - CaO_2)$], and simple equations [$Q_s/Q_T=AaDO_2/20$].

Results: Shunts by classic physiologic, estimated, and modified clinical shunt equation were $26.9 \pm 8.5\%$, $25.1 \pm 7.1\%$, and $26.3 \pm 8.2\%$, respectively and did not differ one another significantly. Shunts by simple shunt equations was $18.8 \pm 6.2\%$ and significantly lower than those by other 3 equations($P<0.05$).

Conclusions: It is reasonable to conclude that in post-open heart patients with stable cardiovascular function and mechanically ventilated with an $F_iO_2=1.0$, classic physiologic, estimated, and modified clinical shunt equations show a reliable reflection of the physiologic shunt. But simple equation ($AaDO_2/20$) might be used as a simple estimate. (Korean J Anesthesiol 1997; 32: 567~573)

Key Words: Shunt equations: classic physiologic, estimated, modified clinical, simple

논문접수일 : 1996년 12월 13일

이 논문은 서울대학교 의과대학원 석사학위 논문임.

이 연구는 96년도 서울대학교 병원 지정진료 공동 연구비(02-96-044)지원에 의한 결과임.

서 론

생리적 섀트(physiologic shunt: Q_{ST}/Q_T)란 심박출량 중 폐포와 전혀 가스교환이 일어나지 않고 좌심으로 관류되는 혈액량을 의미한다. 산소화란 관점에서 볼 때, 완전한 폐포란 이상적인 폐포 산소분압(이하 P_{AO_2} 라 함)인 101 mmHg를 대기 호흡 중 유지하는 것이다¹⁾. 만일 폐포 확산이 완전하다면 말초 폐모세혈관 혈액은 이상적인 폐포내 산소분압과 동일한 산소 분압을 유지할 것이며, 결국 이를 이용해 말초 폐모세혈관 산소함량(pulmonary end capillary oxygen content: 이하 CcO_2 라 함)은 다음과 같이 계산할 수 있다^{2,3)}.

$$CcO_2(\text{ml/dl}) = Hb \times 1.34 + P_{AO_2} \times 0.0031$$

모든 혈액이 완전한 폐포와 완전히 가스교환이 일어난다면, 대기호흡시 P_{AO_2} =말초 폐모세혈관 산소분압(이하 P_{EO_2} 라 함)=동맥혈 산소분압(이하 PaO_2 라 함)한 식이 성립되고 동맥혈 저산소혈증은 생기지 않는다.

동맥혈 저산소혈증의 원인으로는 확산장애, 환기/관류(이하 V/Q 라 함) 불균형, 폐내 섀트 및 폐포환기 저하(alveolar hypoventilation) 및 흡입산소율(이하 FiO_2 라 함)등 여러 인자가 관여한다⁴⁾.

폐내 섀트란 혈액이 전혀 폐포와 가스교환이 일어나지 않고 심박출량의 일부가 우심에서 좌심으로 관류하는 참섀트(true shunt)와 비록 폐포와 환기는 되나 환기/관류 불균형에 의해 PaO_2 가 정상보다 감소하는 섀트 효과(shunt effect) 등으로 구분된다.

대부분의 임상가들은 동맥혈 저산소혈증이 존재하면 생리적 섀트가 있다고 믿는다. 물론 틀린 말은 아니나 섀트가 동맥혈 산소화에 미치는 영향에는 혈액소(이하 Hb라 함) 함량 및 그의 포화도, 심기능, 대사율 등 다른 요소에 의해서도 영향을 받을 수 있다⁵⁾. 섀트 계산은 Fick의 원칙을 응용한 고식적 섀트 공식(classical shunt equation)이 기본이 된다⁶⁾. 그러나 고식적 섀트 공식은 폐모세혈관 후 산소함량을 직접적으로 측정할 수 없을 뿐만 아니라 폐동맥 도관을 시행하지 않으면 혼합 정맥혈 산소 함량은 이용할 수 없으므로 임상적인 유용성이 감소한

다³⁾. 그러므로 임상적인 편이에 따라 여러 가정과 조건을 적용하여 보다 간단한 섀트 공식들이 유도되었다. 이러한 가정과 조건들을 전제로 한 섀트 공식들의 정확도에 의문을 제기하고, 본 연구에서는 FiO_2 1.0에서 가정을 충족하는 서로 다른 섀트 공식들에 의한 계산결과를 비교관찰하여, 임상에 적용시킬 때, 수치의 정확도, 그리고 공식들 사이의 상관관계를 관찰하고자 하였다.

대상 및 방법

1) 연구대상

서울대학교 병원에서 교육연구부의 임상연구 허가와 개심술을 시행받는 성인환자 40명을 대상으로 마취 전에 환자 및 보호자의 동의를 받은 후 본 연구에 임하였다. 남자는 17명, 여자는 23명이었으며, 평균연령은 50.8세(20세~72세), 평균체중은 62.9 kg (43 kg~90 kg)이었다.

대상환자들의 수술전 진단명은 Table. 1과 같았으며 시행한 수술명은 관상동맥우회술 20명, 심장판막 교체 또는 성형 16명, 흉부 대동맥 이식술 2명, 심실중격결손 폐쇄술 1명, 심막절제술 1명, Maze 썬 수술 1명, 관상동맥루 폐쇄술 1명 이었다(한 환자에 2가지 이상의 수술을 한 경우를 포함한 것임).

2) 연구방법

마취 전투약 없이 각성상태에서 변형된 Allen씨 검사를 한 후 요골동맥에 20 gauge 카테터를 거치하여 지속적인 동맥압의 감시와 동맥혈의 가스분석을 위한 채혈로로 사용하도록 하였다. 또한 우측 내경 정맥을 통하여 7 F. Swan-ganz 카테터(Edwards, Baxter Healthcare Co. Irvine USA)를 폐동맥에 거치하여 혼

Table 1. Categories of Preoperative Diagnosis

Disease	Number of patients
Valvular heart disease	16
Ventricular septal defect	1
coronary artery disease	20
coronary sinus aneurysm	1
Thoracic aortic aneurysm	2

합정맥혈 가스분석을 위한 채혈로 사용하였으며, 카테타의 위치는 수술실에서 즉시 흉부 방사선 사진으로 확인 하였다.

마취유지는 간헐적 fentanyl 정주로 이루어졌으며 필요하면 1 MAC 이하의 isoflurane 흡입방법을 겸용 하였다. 수술 후 호흡관리 중환자실로 이송된 환자는 심전도, 동맥혈압 측정 장치, 인공호흡기를 부착 하였다. 이송 후 처음 단계에서의 인공호흡은 Bear 2 성인용 양조절 인공 호흡기(Bear medical systems, Riverside, USA) 혹은 Servo ventilator 900C (Siemens-Elcoma AB, solna, Sweden)를 이용하여 $F_{I}O_2$ 1.0, 일회 호흡량 10~15 ml/kg, 호기말 양압(positive end-expiratory pressure: PEEP) 0~5 cmH₂O로 하여 호기말 이산화탄소분압이 35~40 mmHg를 유지할 수 있도록 조절해 가며 조절호흡을 실시하였다. 환자의 자발호흡으로 조절호흡이 어려우면 morphine 0.1 mg/kg, diazepam 0.2~0.3 mg/kg, vecuronium 0.1 mg/kg의 간헐적 정주를 시행하였다.

중환자실 이송 후 적어도 30분 이상 경과하고 환자의 혈액학적 상태가 안정되면 폐동맥을 통하여 혼합정맥혈을, 요골동맥을 통해 동맥혈을 동시에 채혈해 Gem-stat 혈액가스 분석기(Gem-stat, mallinckrodt sensor systems, Ann Arbor, USA)를 사용해 즉시 가스분석을 시행하였다.

혈액가스 분석결과를 토대로 폐모세혈관 산소합량(CcO_2), 동맥혈 산소합량(이하 CaO_2 라 함), 혼합정맥혈 산소합량(이하 $C\bar{v}O_2$ 라 함), 폐포-동맥혈 산소 분압차(이하 $AaDO_2$ 라 함) 등 섀트 공식에 사용할 수 있는 수치들을 다음 식에 의해 계산하였다⁴⁾.

$$\begin{aligned} CcO_2(\text{ml/dl}) &= Hb \times 1.34 \times 1.0 + PaO_2 \times 0.0031 \\ CaO_2(\text{ml/dl}) &= Hb \times 1.34 \times SaO_2 + PaO_2 \times 0.0031 \\ C\bar{v}O_2(\text{ml/dl}) &= Hb \times 1.34 \times S\bar{v}O_2 + P\bar{v}O_2 \times 0.0031 \\ AaDO_2(\text{mmHg}) &= PaO_2 - PaO_2 \\ &= [F_{I}O_2(P_B - P_{H_2O}) - 1.25 \times PaCO_2] - PaO_2 \end{aligned}$$

상기 공식에서는 폐모세혈관 혈액이 폐포와 완전히 가스교환이 일어나고 100% 포화되었다는 가정에서 폐모세혈관 산소포화도(이하 S_{cO_2} 라 함)=1.0, P_{cO_2} = P_{aO_2} 로 계산하였으며, P_B =760mmHg, P_{H_2O} =47 mmHg (37°C)로 계산되었다⁷⁾.

이런 수치들을 이용하여 폐섀트율을 4가지 서로

다른 계산법 즉 고식적 섀트 공식 [$Q_s/Q_T(cp)$], 예측 섀트 공식 [$Q_s/Q_T(e)$], 변형 임상 섀트 공식 [$Q_s/Q_T(mc)$], 약식 섀트 공식 [$Q_s/Q_T(s)$]을 사용하였는 바 그 계산 공식은 다음과 같다¹⁾.

고식적 섀트 공식⁸⁾:

$$Q_s/Q_T(cp)](\%) = \frac{(CcO_2 - CaO_2) \times 100}{CcO_2 - C\bar{v}O_2}$$

예측 섀트 공식:

$$Q_s/Q_T(e)(\%) = \frac{(CcO_2 - CaO_2) \times 100}{3.5 + CcO_2 - CaO_2}$$

변형 임상 섀트 공식:

$$Q_s/Q_T(mc)](\%) = \frac{AaDO_2 \times 0.0031 \times 100}{(CcO_2 - C\bar{v}O_2) + AaDO_2 \times 0.0031}$$

(단, $PaO_2 > 150$ mmHg)

약식 공식:

$$Q_s/Q_T(s)(\%) = \frac{AaDO_2}{20} \quad (\text{단, } F_{I}O_2 \text{ 1.0})$$

본 연구의 모든 측정치와 계산치들은 평균±표준 편차(mean±S.D.)로 표시하였으며, 4 공식들 간의 섀트의 비교는 ANOVA 와 Tukey Test로 하였다. 또한 직선 회귀식으로 이들 사이의 상관관계를 비교하였다. 모든 경우 $p < 0.05$ 를 통계적으로 유의한 것으로 간주하였다.

결 과

성인의 개심술 후 호흡관리 중환자실에서 인공호흡기를 이용하여 환기를 정상범위로 유지하며 $F_{I}O_2$ 1.0으로 조절호흡을 시행했을 때의 섀트는 고식적 섀트공식을 사용하였을 때에는 $26.9 \pm 8.6\%$, 예측 섀트 공식에서는 $25.1 \pm 7.1\%$, 변형 임상 섀트 공식에서는 $26.3 \pm 8.2\%$ 로 상호간에 별 차이를 찾아볼 수 없었다(Table 2). 그러나 약식 섀트 공식을 사용시에는 섀트는 $18.8 \pm 6.2\%$ 로 고식적 섀트 공식 사용시와 비교하여 유의하게 낮았다($p < 0.05$)(Table 2).

직선 회귀식을 이용한 공식간의 상관관계는 단지

Table 2. Pulmonary Shunts Calculated by Classic Physiologic, Estimated, Modified Clinical and Simple Shunt Equations:

Shunt equations used	Shunt(%)
$Q_s/Q_T(cp)$	26.9 ± 8.6
$Q_s/Q_T(e)$	25.1 ± 7.1
$Q_s/Q_T(mc)$	26.3 ± 8.2
$Q_s/Q_T(s)$	$18.8 \pm 6.2^*$

Data are mean $\pm$ S.D. N=40 in each equations used.

*: $p < 0.05$ vs $Q_s/Q_T(cp)$, $Q_s/Q_T(e)$, and $Q_s/Q_T(mc)$. Refer to the text for full equations.

Fig. 1. Relationship between classic physiologic and modified clinical shunts. $Q_s/Q_T(cp)$ and $Q_s/Q_T(mc)$

고식적 섀트 공식과 변형 섀트 공식 간에 유의하였는 바 다음과 같은 직선 회귀식을 나타내었다(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3.)

$$Q_s/Q_T(mc) = 0.945 Q_s/Q_T(cp) + 0.863 (R^2 = 0.982, P < 0.001)$$

$$Q_s/Q_T(e) = 0.504 Q_s/Q_T(cp) + 11.5 (R^2 = 0.375, P < 0.001)$$

$$Q_s/Q_T(s) = 0.444 Q_s/Q_T(cp) + 6.82 (R^2 = 0.382, P < 0.001)$$

Fig. 2. Relationship between classic physiologic and estimated shunts. $Q_s/Q_T(cp)$ and $Q_s/Q_T(e)$ **Fig. 3.** Relationship between classic physiologic and simple shunts. $Q_s/Q_T(cp)$ and $Q_s/Q_T(s)$

고 찰

참섀트(true shunt)란 해부학적 섀트와 모세혈관 섀트로 구성된다¹⁾. 해부학적 섀트란 선천성 심장질환처럼 혈류가 우심에서 좌심으로 직접 유입되는 경우, 외상, 질환 혹은 선천적으로 폐내 누공(fistula)이 있는 경우 및 폐종양 중 혈관 분포가 다량으로 있는 경우처럼 혈액이 폐포와 접촉하지 못하고 직접 폐정맥으로 유입되는 경우를 말한다. 모세혈관 섀트란 무기폐나 폐렴, 폐농양, 폐수종처럼 폐포 수분 축적이 있어서 폐포가스가 모세혈관 혈액과 접촉하지 못하는 경우를 말한다.

섀트 공식은 다음의 수학적 설명으로 유도될 수가 있다. Fick의 원칙에 의하면 심박출량(이하 Q_T 라 함)은 다음과 같다⁹⁾.

$$Q_T = \frac{VO_2}{CaO_2 - C\bar{v}O_2} \dots\dots\dots(7)$$

심박출량은 폐포가스와 완전하게 가스교환이 일어나는 부분 (Q_C)과 폐포가스와 전혀 가스교환이 되지 않는 부위 즉 섀트부분 (Q_S)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$Q_T = Q_C + Q_S \dots\dots\dots(8)$$

Q_C 란 모든 혈액이 폐를 통하여 완전히 산소화되기 때문에 이론적으로 이상적인 폐포가스와 폐모세혈관 혈액이 평형상태에 있다는 가정이 가능하며 따라서 말초 모세혈관(end-capillary)의 산소함량은 이런 가정하에서는 다음과 같은 계산으로 구해질 수가 있다.

$$\begin{aligned} CcO_2 &= Hb \times 1.34 \times ScO_2 + P_cO_2 \times 0.0031 \\ &= Hb \times 1.34 \times 1.0 + P_AO_2 \times 0.0031 \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

이처럼 CcO_2 는 실측정치라기 보다는 오히려 이론적 개념이 많이 내포되는 값이다. 때문에 계산상 이상적인 폐포분압(P_AO_2)을 이용하는 경향이 있다¹⁰⁾.

$$P_AO_2 = F_iO_2(P_B - PH_2O) - 1.25 \times PaCO_2 \dots\dots\dots(10)$$

단 P_B = 1기압하 760 mmHg

PH_2O = 37°C에서 47 mmHg

고식적 생리적 섀트 공식은 다음과 같이 재배열해 쓸 수 있는데, 이를 임상 섀트 공식이라 한다.

$$\begin{aligned} Q_S/Q_T(cp)(\%) &= \frac{(CcO_2 - CaO_2) \times 100}{CcO_2 - C\bar{v}O_2} \quad (\text{고식적 섀트 공식}) \end{aligned}$$

$$= \frac{(CcO_2 - CaO_2) \times 100}{(CcO_2 - C\bar{v}O_2) + (CcO_2 - CaO_2)} \quad (\text{임상 섀트 공식})$$

동맥혈 저산소혈증은 동맥혈 산소 분압(이하 PaO_2 라 함)의 감소를 의미하며, 그 원인은 심혈관계 인자와 폐내인자의 두 가지가 있다. 심혈관계 인자인 우좌섀트가 해부학적으로 없다면 동맥혈 저산소혈증의 원인은 대부분 폐내인자에 의한 것이다. 그러므로 이를 정확히 판단하기 위해서는 폐동맥내 카테타의 거치가 필요하다. 그러나 대부분의 환자들은 폐동맥내 카테타의 거치가 되어있지 않기 때문에 공식(10)에서 우리가 " $(CaO_2 - C\bar{v}O_2)$ " 값만 알 수 있다면 섀트는 쉽게 계산될 수 있다. 일반적으로 휴식 중인 건강한 사람에서의 $(CaO_2 - C\bar{v}O_2)$ 값은 4.5에서 6.0 Vol% 정도이다¹¹⁾. 환자가 심혈관계가 안정되고 대사율이 일정하다고 가정하면 " $(CaO_2 - C\bar{v}O_2)$ " 값은 항상 일정할 것이다¹²⁾. 임상적으로 대부분의 중환자에서 심혈관계가 안정된 경우라면, 공식(10)에 $(CaO_2 - C\bar{v}O_2) = 3.5$ vol%를 대입하여 흔히 사용되는데 이를 예측 섀트 공식(estimated shunt equation)이라 한다¹⁾.

$$\begin{aligned} Q_S/Q_T(e)(\%) &= \frac{(CcO_2 - CaO_2) \times 100}{3.5 + (CcO_2 - C\bar{v}O_2)} \quad (\text{예측 섀트 공식}) \\ &\dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

본 연구에서 대부분 환자가 수술 후 심혈관계가 안정된 상태에서 연구가 이루어졌으므로 예측 섀트 공식 계산에 별 무리가 없었을 것이다. 이는 고식적 섀트 공식에 의한 섀트 $26.9 \pm 8.6\%$ 에 비해 예측 섀

트 공식에 의한 섀트가 $25.1 \pm 7.1\%$ 로 양자간에 별 차이가 없었다는 데서 알 수 있다. 따라서 고식적 섀트 공식 대신에 예측 섀트 공식이 유용하게 사용될 수 있음을 시사하고 있다.

한편 PaO_2 가 150 mmHg 이상이고, 동맥혈의 혈색소(Hb)가 100% 산소로 포화 되었다면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} CcO_2 - CaO_2 &= (Hb \times 1.34 \times 1.0 + PaO_2 \times 0.0031) \\ &\quad - (Hb \times 1.34 \times SaO_2 + PaO_2 \times 0.0031) \\ &= (PaO_2 - PaO_2) \times 0.0031 \\ &= AaDO_2 \times 0.0031 \dots\dots\dots (A)^{13)} \end{aligned}$$

공식(口)의 임상섀트 공식은 다음과 같이 쓰여질 수 있는 데, 이를 변형 임상 섀트 공식이라 한다.

$$\begin{aligned} Q_s/Q_T(mc)(\%) &= \\ &= \frac{AaDO_2 \times 0.0031 \times 100}{(CcO_2 - C\bar{v}O_2) + AaDO_2 \times 0.0031} \\ &\quad \text{(변형 임상 섀트 공식)} \end{aligned}$$

이 공식은 심혈관계가 안정되고, “ $(CcO_2 - C\bar{v}O_2)$ ” 값을 상기한 대로 가정 한다면 $AaDO_2$ 만 가지고도 섀트를 계산할 수 있으며¹⁴⁾, 본 연구에서 보는 바와 같이 이 공식에 의한 계산에서 섀트가 $26.3 \pm 8.2\%$ 로 고식적 섀트 공식이나 예측 섀트 공식에 의한 섀트와 별 차이가 없었음은 이와 비슷한 조건에서는 이 공식이 유용하게 사용될 수 있음을 시사하고, Fig. 1, 2, 3.의 상관관계에서 보듯이 고식적 섀트 공식과 변형 섀트 공식간의 관계가 가장 밀접하다고 볼 수 있겠다. 아울러 본 연구에서 FiO_2 1.0으로 조절 호흡할 때 PaO_2 가 적어도 150 mmHg 이상 유지되고 있음을 의미한다고 하겠다. 이 공식의 제한점은 PaO_2 가 100 mmHg 이하일 경우인데, 이 때는 산소의 함량이 주로 혈색소-산소(Hb-O₂)해리 곡선에서 보는 것처럼 Hb의 산소포화도에 의해 결정되기 때문이다.

FiO_2 1.0으로 호흡시 20~30분 경과 후 동맥혈 가스분석에서 PaO_2 가 550 mmHg 이상이 된다면 이 환자가 갖고 있었던 동맥혈 저산소혈증은 단지 환기 저하에 의한 환기/관류 불균형의 결과라 할 수 있다. FiO_2 1.0으로 호흡시 정상 해부학적 섀트는 3~5%에 해당하며 $AaDO_2$ 는 100~125 mmHg 정도이다. 순수히

$AaDO_2$ 만 이용한다면 FiO_2 1.0에서 섀트는 $AaDO_2$ 매 50 mmHg 증가시 2% 정도 증가하므로 다음 식을 유추해 낼 수 있다^{2,15)}.

$$Q_s/Q_T(s)(\%) = \frac{AaDO_2}{20} \dots\dots\dots (L)$$

그러나 본 연구에서처럼 이 공식에 의한 섀트가 $18.8 \pm 6.2\%$ 로 전자의 세 공식에 비해 의미있는 차이가 있으므로, 이 공식은 단순히 빠른 계산으로 섀트를 유추할 수 있을지언정 임상적으로 그리 신빙성을 갖고 사용할 만한 공식은 아닌 듯 하다.

참 고 문 헌

- Shapiro BA, Kacmarek RM, Cane RD, Peruzzi WT, Hauptman D: Clinical application of respiratory care. 4th ed. St.Louis, Mosby Year Book. 1991, pp 233-51.
- Marshall BE, Whyche MQ: Hypoxemia during and after anesthesia. Anesthesiology 1972; 37: 178-209.
- Barnes TA: Respiratory care practice. 1st ed. Chicago, Year Book Medical publishers. 1988, pp 564-7.
- 김성덕: 소아호흡관리. 서울, 군자출판사. 1995, pp 43-4, 308-10, 331-2.
- Nunn JF: Nunn's applied respiratory physiology. 4th ed. London, Butterworths. 1993, pp 177-97.
- Benumof JL: Anesthesia for Thoracic surgery. 2nd ed. Philadelphia, W.B. Saunders company. 1995, pp 86-102.
- Forster RE: Exchange of gases between alveolar air and pulmonary capillary blood: Pulmonary diffusing capacity. Physiol Rev 1959; 37: 391.
- Berggren SM: The oxygen deficit of arterial blood caused by nonventilation to parts of the lung. Acta physiol scand(suppl 11) 1942; 4: 1.
- Kacmarek RM, Mark CW, Dimas S: The essentials of respiratory therapy. 2nd ed. Chicago, Year Book Medical Publishers. 1985, pp 214-20.
- Comroe JH, Forester RF, Dubois AB, et al: The lung clinical physiology and pulmonary function tests. Chicago, Year Book Medical publishers. 1962, pp 339.
- Cournand A, et al: Measurements of cardiac output in man using the technique of catheterization of the right auricle or ventricle. J Clin Invest 1945; 24: 106
- Harrison RA, Davison R, Shapiro BA, et al: Reas-

- essment of the assumed A-V oxygen content difference in the shunt calculation. *Anesth Analg* 1975; 54: 198.
13. Farhi LE, Rahn H: A theoretical analysis of alveolar difference with special reference to the distribution effect. *J Appl Physiol* 1955; 7: 699.
14. Lilienthal JL, Riley RL, Proemmel DD, et al: An experimental analysis in the man of the oxygen pressure gradient from alveolar air to arterial blood. *Am J Physiol* 1946; 147: 199.
15. Kaplan JA: Thoracic anesthesia. 1st ed. New York, Churchill livingstone. 19-83, pp 687-8.
-